文章编号:1000-4939(2024)02-0372-10

基于村镇建筑的新型沙漠砂混凝土砌块墙体的抗震性能研究

吴楠[1],王玉山[1,2],王锐[3],牛爱宏[1],王迪[1]

(1. 石河子大学水利建筑工程学院,832000 石河子;
2. 新疆兵团高烈度寒区建筑抗震节能技术工程实验室,832000 石河子;3. 石河子大学理学院,832000 石河子)

摘　要:利用沙漠砂研发的蒸压加气混凝土砌块是一种新型砌体材料。为了研究这种新型砌块在村镇建筑中的应用,考虑在不同竖向压应力和构造柱的约束作用下,对 4 片沙漠砂蒸压加气混凝土砌块墙体开展拟静力试验,通过对比分析 4 片墙体在低周反复荷载作用下的破坏特性、力-位移曲线、骨架曲线、刚度退化曲线及延性等性能指标。结果表明:1)墙体主要以剪切破坏为主,未设置构造柱墙体主裂缝沿约 45°贯彻整个墙体,设置构造柱墙体主裂缝呈“倒八”字型,且当竖向压应力增大时,墙体的抗震承载力也随之增大,抗侧刚度有所提高,但延性随之减小;2)竖向压应力相同情况下,对比分析表明设置构造柱墙体的极限承载力约是素墙体的 2.22 倍,延性提高了约 60%,且刚度也有所提升;3)基于主拉应力理论和库仑破坏理论分别建立了适用于该新型砌块墙体的抗震承载力计算公式,且库仑破坏理论建立的抗震承载力计算公式应用更合理;4)建立了恢复力模型骨架曲线,能够较好地反映沙漠砂蒸压加气混凝土砌块墙体的试验特点。

关键词:沙漠砂蒸压加气混凝土砌块;构造柱;拟静力试验;抗震性能;承载力;恢复力模型

中图分类号:TU312;TU528.2　**文献标志码**:A　**DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2024.02.011

Study on seismic performance of new desert sand concrete block wall based on village buildings

WU Nan[1], WANG Yushan[1,2], WANG Rui[3], NIU Aihong[1], WANG Di[1]

(1. College of Water & Architectural Engineering, Shihezi University, 832000 Shihezi, China;
2. Production & Construction Groups Engineering Laboratory for Seismic and Energy-Saving Building in High Earthquake Intensity and Cold Zone, 832000 Shihezi, China; 3. College of Sciences, Shihezi University, 832000 Shihezi, China)

Abstract: The autoclaved aerated concrete block developed by desert sand is a new type of masonry material. A pseudo-static test considering the different vertical compressive stresses and constraints of structural columns is carried out on four pieces of desert sand wall made of autoclaved aerated concrete

收稿日期:2021-02-25　　**修回日期**:2022-01-25
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51468058);新疆生产建设兵团第五师科技支撑项目(No. 21GY02;20GY02)
通信作者:王玉山,副教授。E-mail:wysbgxn@shzu.edu.cn
引用格式:吴楠,王玉山,王锐,等. 基于村镇建筑的新型沙漠砂混凝土砌块墙体的抗震性能研究[J]. 应用力学学报,2024,41(2):372-381.
WU Nan, WANG Yushan, WANG Rui, et al. Study on seismic performance of new desert sand concrete block wall based on village buildings [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2024, 41(2): 372-381.

block in order to study the application of this new block in village buildings. The failure characteristics i. e., force-displacement curve, skeleton curve, stiffness degradation curve and ductility of the four walls under low cyclic loading are compared and analyzed. The test results show: 1) The wall is mainly shear failure. The main crack of the wall without structural columns runs through the entire wall is about 45°, and the main crack of the wall with structural columns is in the shape of "inverted eight". And when the vertical compressive stress increases, the seismic capacity of the wall increases, the lateral stiffness improves, but the ductility decreases. 2) Under the same vertical compressive stress, comparative analysis shows that the ultimate bearing capacity of the wall with structural columns is increased by about 2.22 times that of plain wall, ductility increased by about 60%, and the stiffness is also improved. 3) Based on the principal tensile stress theory and Coulomb failure theory, the calculation formulas for the seismic bearing capacity of the new block wall are established, and the calculation formula of seismic bearing capacity established by Coulomb failure theory is more reasonable in application. 4) The skeleton curve of the established restoring force model can reflect the experimental characteristics of the desert sand autoclaved aerated concrete block wall well.

Key words: desert sand autoclaved aerated concrete block; structural column; pseudo-static test; seismic performance; bearing capacity; restoring force model

由于经济水平、地域性和民俗的差异，据调查新疆广大农村建筑多数仍采用砌体结构[1-3]，而传统砌体结构中的黏土砖又会消耗大量的资源，严重污染和破坏了环境[4]，因此，研发一种新型墙体材料就具有非常重要的现实意义。新疆是我国主要的地震频发区之一，并且具有丰富的自然资源——沙漠砂[5-6]。ZHANG 等[7]对不同区域的沙漠砂进行了研究，得出其元素成分以及粒径大小都存在差异，对混凝土的力学性能也有影响。李志强等[8]研究了不同沙漠砂替代率对沙漠砂混凝土力学性能的影响。JIN 等[9]用毛乌素沙漠砂制备出能满足一般工程要求的高强度混凝土。本研究采用的沙漠砂蒸压加气混凝土砌块是用沙漠砂替代普通河砂制得的新型砌块，沙漠砂替代率为 100%，其中使用的沙漠砂来自于新疆古尔班通古特沙漠，具体为新疆新疆生产建设兵团第五师 83 团沙山子镇，沙漠砂成分构成见表 1，该沙漠砂的粒径为 100 ~ 300 nm。制备的砌块具有容重轻、可加工性强、保温效果好、抗冻性能强等特点。是一种绿色节能的墙体材料，在新疆低层村镇建筑中具有广泛的应用市场。

本研究针对低层村镇建筑，设计了 4 片沙漠砂蒸压加气混凝土砌块墙体，其中 3 片墙体设置构造柱，分别承受 0.1、0.3、0.5 MPa 的竖向压应力；另外 1 片墙体作为对照组。分别开展了拟静力试验研究，对比分析了墙体的破坏性特征、力-位移曲线、骨架曲线、刚度退化曲线和延性等指标，并建立了该新型砌块墙体的抗震承载力计算公式以及恢复力模型骨架曲线。

表 1　新疆生产建设兵团第五师 83 团沙山子镇沙漠砂成分构成

Tab. 1　Desert sand composition of 83 Regiment, 5th Division, Xinjiang Production and Construction Corps

成分构成	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	CaO	K_2O	Fe_2O_3	MgO	Zr	Sr	Rb
质量分数/%	67.1	17.9	4.94	4.22	3.48	1.35	0.843	0.009	0.025 7	0.020 4

1　试验概括

1.1　材料性能

本试验采用的砌块尺寸为 600 mm × 200 mm × 200 mm。根据《蒸压加气混凝土性能试验方法》[10]测得砌块密度以及抗压强度；依据《砌体基本力学性能试验方法标准》[11]测得砌体的抗压强度以及砌体沿通缝截面抗剪强度；砂浆强度等级设计采用 M7.5，浇筑 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm 的砂浆试块，测得砂浆实际抗压强度，结果见表 2。

表2 材料性能表

Tab. 2 Material performance

砌块密度/(kg·m^{-3})	砌块抗压强度/MPa	砌体抗压强度/MPa	砌体通缝抗剪强度/MPa	砂浆抗压强度/MPa
615	6.25	1.75	0.103	6.75

1.2 试件设计

为研究竖向压应力的不同对该种墙体抗震性能的影响,根据《砌体结构设计规范》[12]的规定,结合实验室的设备条件,因此控制4片墙体的尺寸一致,按照高宽比小于1,设计了墙体的尺寸为1 270 mm×1 820 mm×200 mm。底梁的长度为3 180 mm、高度和宽度分别为350 mm,底梁和构造柱分别采用C30和C20的混凝土,每根构造柱采用4根直径12 mm的HRB335的带肋钢筋,构造柱的截面尺寸为180 mm×200 mm。4片墙体的基本设计参数见表3,设构造柱墙体尺寸见图1,无构造柱的素墙体尺寸见图2。

表3 试件的设计参数

Tab. 3 Design parameters of specimens

序号	编号	高宽比	设计尺寸/mm	墙体类别	竖向荷载/MPa
1	WZ-1	0.7	1 270×1 820	设构造柱	0.1
2	WZ-2	0.7	1 270×1 820	设构造柱	0.3
3	WZ-3	0.7	1 270×1 820	设构造柱	0.5
4	WZ-4	0.7	1 270×1 820	素墙体(无构造柱)	0.3

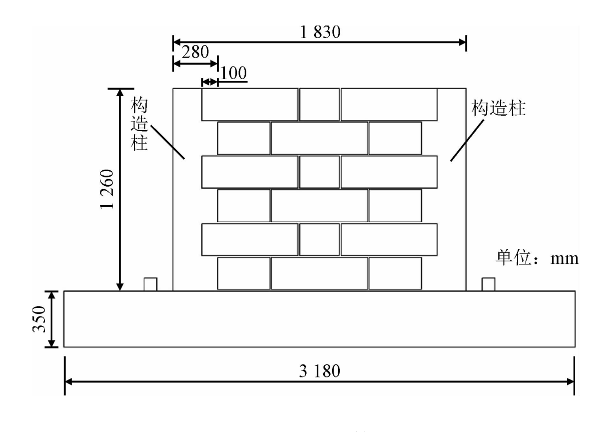


图1 设构造柱墙体尺寸图

Fig. 1 Structure column wall size chart

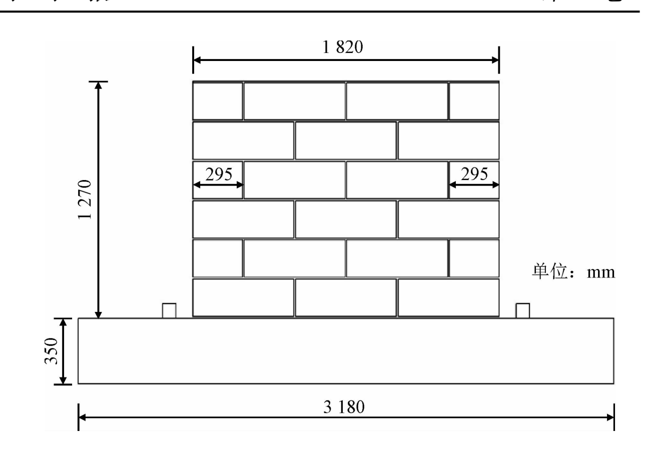


图2 素墙体尺寸图

Fig. 2 Dimensions of plain wall

1.3 加载方案

本试验通过MTS作动器对墙体顶部中心位置施加水平荷载,为了防止局部压应力过大,在作动器与墙体接触面进行了增大接触面积的处理。反力架上的千斤顶施加竖向压应力,为使荷载的布置均匀,设置分配梁将荷载传递到墙体上。加载装置见图3。

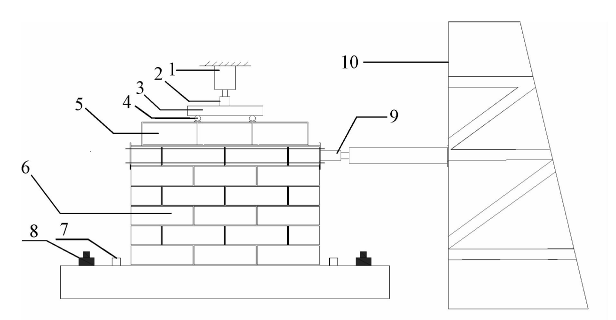


图3 加载装置图

Fig. 3 Loading device diagram

垂直加载控制:将竖向荷载施加至墙体,设构造柱的墙体采用0.1、0.3、0.5 MPa竖向压应力进行对比试验,素墙体只用0.3 MPa的竖向压应力进行对比试验。

水平加载控制:采用位移加载,在墙体出现裂缝之前,控制各级位移增值在预估开裂位移Δ的1/3,每级位移加载重复两次;墙体有显著的裂缝时,控制位移按照开裂位移的倍数施加,即为±2Δ、±3Δ、±4Δ……,当墙体承载力下降到极限承载力的85%以下时,加载结束,加载系统曲线如图4所示。

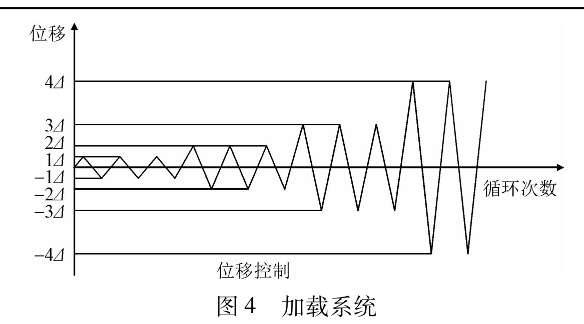


图 4　加载系统

Fig. 4　Loading system

1.4　量测内容

试验数据采用 TDS 数据采集系统采集,墙体的位移和扭转由位移传感器采集。位移计布置于墙体试件的一端,沿墙高上、中、下 3 个位置布置,用于测量墙体的水平移动,并设置斜拉位移计,测定墙片扭转,同时在底梁设置百分表,用于观察底梁移动距离。具体布置见图 5。

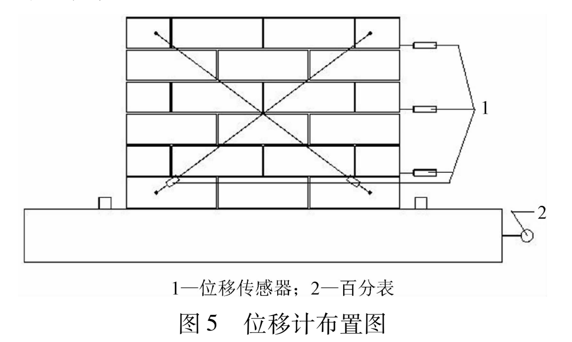


图 5　位移计布置图

Fig. 5　Displacement ter layout plan

2　试验结果及分析

2.1　墙体破坏过程

对于墙体 WZ-1,水平位移 $\Delta=2.0$ mm 时,墙体左上部出现细微的斜裂缝,随着位移的增加,裂缝增多。$\Delta=3.2$ mm 时,左下砌块和构造柱的连接处产生垂直裂缝。$\Delta=4.7$ mm 时,斜向裂缝出现在墙体右半部分,由砌块延伸至构造柱。$\Delta=5.0$ mm 时,裂缝倾斜地出现在墙体的左下方,并向上延伸到左侧构造柱。当 $\Delta=5.6$ mm 时,左侧构造柱的中下部产生水平裂缝,同时墙体中部的裂缝有剥落现象。当 $\Delta=8.6$ mm 时,墙体灰缝脱落,墙体主裂缝呈现"倒八"型。当 $\Delta=10.9$ mm 时,墙体的剥落严重,主裂缝从构造柱延伸向砌块;当 $\Delta=16.9$ mm 时,墙体承载力下降到极限承载力的 85% 以下,试验结束,构造柱内部钢筋未露出。墙体裂缝见图 6。



图 6　WZ-1 裂缝示意图

Fig. 6　The fracture diagram of WZ-1

对于墙体 WZ-2,当水平位移 $\Delta=2.8$ mm 时,不明显的细微裂缝出现在墙体的左上角。$\Delta=3.5$ mm 时,原有裂缝加宽,并且右侧的构造柱下部也有水平开裂现象。$\Delta=4.2$ mm 时,裂缝开始分别从墙体左上方和右上方延伸到中下方,并且中部也产生了斜裂缝。$\Delta=5.6$ mm 时,穿过墙体的长裂缝出现在墙体的右侧,裂缝出现在左侧构造柱的中部和下部。$\Delta=7.4$ mm 时,裂缝继续加宽,左侧构造柱与墙体连接处的裂缝扩大至 2 mm。$\Delta=14.0$ mm 时,墙体大量剥落,墙体主裂缝呈"倒八"型。当 $\Delta=17.7$ mm,墙体承载力下降到极限承载力的 85% 以下,试验结束,构造柱内部钢筋未露出。墙体裂缝见图 7。

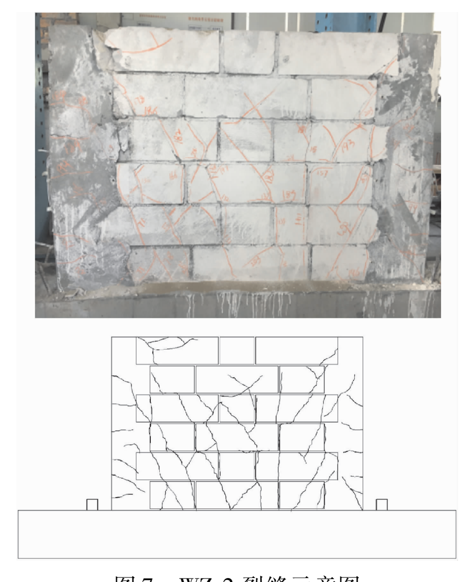


图 7　WZ-2 裂缝示意图

Fig. 7　The fracture diagram of WZ-2

对于墙体 WZ-3,当水平位移 $\Delta=2.9$ mm 时,首

先,墙体右下方产生细小的斜裂缝。当 $\Delta=3.0$ mm 时,出现宽度为 0.1 mm 的垂直裂缝,从墙体的中部延伸到墙体的底部。当 $\Delta=3.8$ mm 时,向下延伸的裂缝出现在墙体的左侧。$\Delta=4.7$ mm,右侧出现 0.2 mm的斜裂缝。当 $\Delta=5.6$ mm 时,墙体中下部产生斜裂缝。当 $\Delta=8.3$ mm 时,构造柱沿水平方向出现开裂,局部产生剥落。当 $\Delta=12.5$ mm 时,墙体左下方的砌块膨胀。当 $\Delta=13.7$ mm 时,左下方膨胀处产生剥落现象,左侧的墙体倾斜裂缝变宽到 2 mm,直至穿透墙体,与此同时墙体上部产生大块鼓包。$\Delta=16.7$ mm 时,墙体出现大量剥落,最上部的砌块已经破坏,墙体即将倒塌,墙体主裂缝整体呈“倒八"字型。当 $\Delta=20.7$ mm,墙体承载力下降到极限承载力的 85% 以下,试验结束,构造柱内部钢筋未露出。墙体裂缝如图 8 所示。

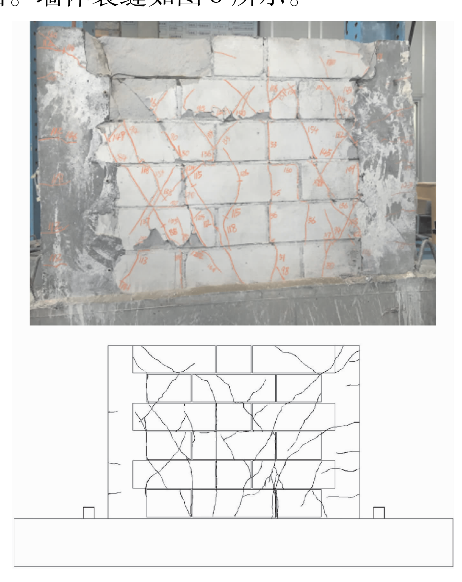


图 8 WZ-3 裂缝示意图

Fig. 8 The fracture diagram of WZ-3

对于墙体 WZ-4,当水平位移 $\Delta=2.0$ mm 时,墙体的中下部出现轻微斜裂缝。$\Delta=5.0$ mm 时,斜向裂缝产生在墙体的右下方灰缝处。$\Delta=5.9$ mm 时,斜裂缝出现在墙体左下角及右下角,右下角裂缝斜向上延伸,同时右上角出现小块剥落。$\Delta=6.5$ mm 时,斜向裂缝加宽至 3 mm,墙体此时发生小面积剥落。$\Delta=8.5$ mm 时,墙体右下方产生断裂裂缝并且贯通第 1、2 皮砌块。$\Delta=10.1$ mm 时,左上角斜向裂缝加宽至 1 cm。$\Delta=11.9$ mm 时,墙壁严重受损并倒塌,此时墙体承载力下降至极限承载力的 85% 以下,试验结束。墙体被剪切破坏,如图 9 所示。

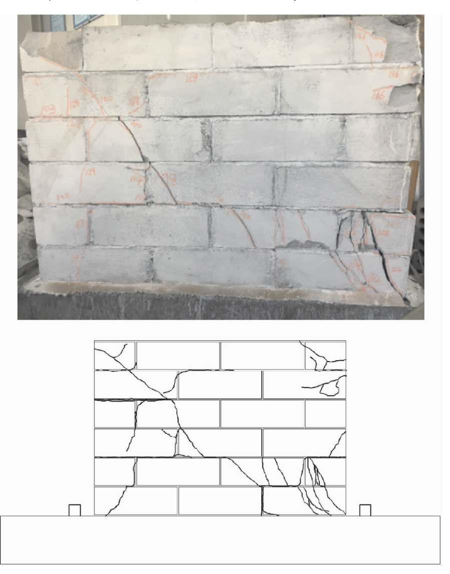


图 9 WZ-4 裂缝示意图

Fig. 9 The fracture diagram of WZ-4

2.2 墙体荷载和位移试验结果

各墙体的主要试验结果见表 4,竖向压应力对墙体的抗震承载力有重要影响。随着竖向压应力的增加,墙体的开裂荷载和极限荷载也逐渐增加。但增加的程度并不相同,如 0.3 MPa 作用下墙体的开裂荷载是 0.1 MPa 的墙体的 1.65 倍,极限荷载是 1.30 倍;但是 0.5 MPa 的竖向压应力作用下的墙体开裂荷载和极限荷载相较于 0.3 MPa 的竖向压应力作用下的墙体提升却有限,主要是因为随着压应力的增加,墙体破坏类型由剪切破坏向斜压破坏转变。

表 4 墙体试验结果

Tab. 4 Wall test results

试件编号	竖向压应力/MPa	开裂荷载/kN	开裂位移/mm	开裂位移角/rad	极限荷载/kN	极限位移/mm	极限位移角/rad	破坏荷载/kN	破坏位移/mm	破坏位移角/rad
WZ-1	0.1	49.7	2.00	1/635	137.9	10.94	1/116	115.26	16.90	1/75
WZ-2	0.3	82.2	2.81	1/452	180.5	15.26	1/83	145.14	17.70	1/72
WZ-3	0.5	90.4	2.87	1/443	182.3	15.52	1/82	139.70	20.70	1/61
WZ-4	0.3	52.4	1.97	1/645	81.02	9.21	1/138	62.52	10.37	1/122

2.3 力-位移曲线

低周反复荷载作用下每片墙体的力-位移曲线见图 10,根据力-位移曲线的特点可以得出以下结果。

(a) WZ-1

(b) WZ-2

(c) WZ-3

(d) WZ-4

图 10　力-位移曲线

Fig. 10　Force-displacement curve

1)开裂前,力-位移曲线接近于直线,滞回面积与残余变形都较小,力-位移曲线大致重合,墙体处在弹性阶段,刚度基本不变。随着荷载的增加,裂缝增加,滞回线开始弯曲,滞回曲线与坐标轴形成的面积逐渐增大。

2)随着水平位移的增加,WZ-1、WZ-2、WZ-3 墙体的滞回环仍旧稳定且饱满,说明墙体的耗能能力优良。卸载后的墙体残余变形也比较小,反映了墙体的弹性恢复力较好。与 WZ-4 墙体相比,墙体 WZ-2 的滞回环有“捏拢”现象,滞回环相较于 WZ-4 也更饱满,体现了构造柱墙体结构有较好的塑性变形能力。

2.4 骨架曲线及分析

墙体的骨架曲线可以在低周反复荷载下直接反映墙体的荷载-位移曲线。每个特征点的荷载和位移都可以通过骨架曲线来实现。WZ-1、WZ-2、WZ-3 和 WZ-4 墙体的骨架曲线如图 11 所示。

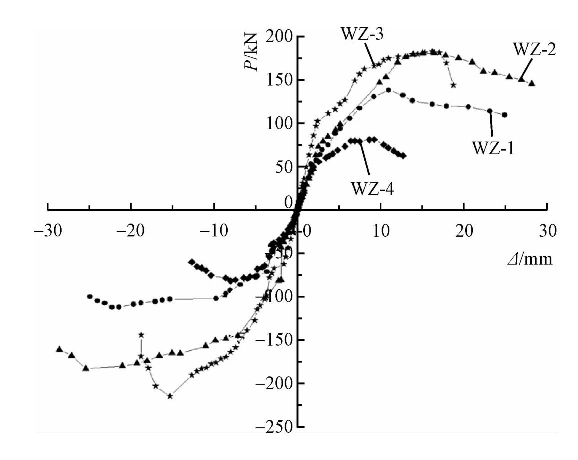


图 11　墙体骨架曲线

Fig. 11　Wall skeleton curve

由图11可知，墙体没有出现裂缝时，骨架曲线大致上是一条斜直线，此时墙体处在弹性阶段；出现裂缝后，骨架曲线渐渐开始弯曲，可以发现拐点，但没有明显的屈服平台，此时墙体处在弹塑性阶段；到达极限荷载后的墙体，其骨架曲线开始下降，墙体的刚度和强度也有所降低。

对比WZ-2和WZ-4墙体可以得出，当竖向压应力相同时，构造柱墙体的骨架曲线峰值远大于素墙体。因此，构造柱对墙体有很好的约束作用，能够大大提高墙体的抗震能力。

对比墙体WZ-1、WZ-2可知，墙体抗震承载能力随着竖向压应力的增加而提高；对比墙体WZ-2、WZ-3分析得出，竖向压应力达到0.3、0.5 MPa时，抗震承载力提高较小，表明在一定的范围内，竖向压应力对墙体的抗震承载力有提升。

WZ-1、WZ-2、WZ-3，相较于WZ-4墙体在荷载峰值前后有一小段平台段，并且荷载比WZ-4墙体的下降幅度更缓，表明构造柱墙体的延性比起素墙体更优良。

2.5 刚度退化曲线及分析

结构或元件的刚度用反复荷载下的割线刚度表示，用下式计算为

$$K_i = \frac{|f_i| + |-f_i|}{|\Delta_i| + |-\Delta_i|} \tag{1}$$

式中，f_i是第i次循环下正向或负向荷载峰值；Δ_i是第i次循环下正向或负向位移峰值，墙体刚度退化曲线见图12。

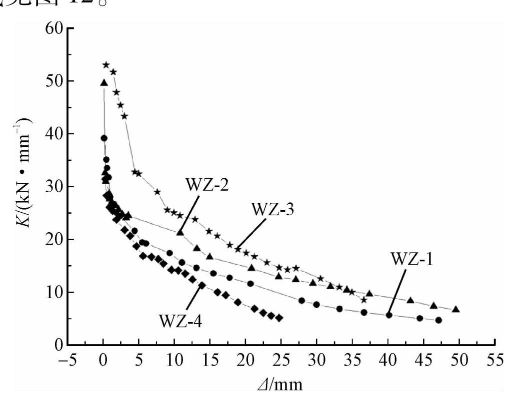


图12 墙体刚度退化曲线

Fig. 12 Wall stiffness degradation curve

由图12可知，4片墙体的刚度退化曲线趋势基本一致。在出现裂缝时，等效刚度迅速下降，下降速率很快，随着水平位移的增大，下降速率开始减慢。当达到墙体的极限承载力时，刚度下降的幅度已大致趋向平缓。

竖向压应力相同的情况下，对比WZ-2和WZ-4墙体，相同位移下，WZ-2墙体的刚度均大于WZ-4墙体，说明设构造柱对墙体的刚度能有所提高。

对比WZ-1、WZ-2、WZ-3墙体刚度发现，竖向压应力会对墙体的刚度产生重大影响，并且随着竖向压应力的增大，墙体的刚度也逐渐增大。

对于WZ-1、WZ-2、WZ-3墙体，刚度虽然随着位移的增加在持续下降，但基本恒定在某一数值，原因是由于构造柱的存在，使得墙体在砌块破坏之后仍具有一定的刚度。

2.6 延性系数及分析

延性系数的确定有许多方法，本研究用位移延性系数[13]来表示延性，表4为墙体的延性系数。其中，λ是极限延性系数；μ是破坏延性系数；Δ_{cr}是试件出现裂缝时的位移；Δ_m是极限荷载的极限位移；Δ_d是荷载下降到极限荷载的85%时所对应的破坏位移。

$$\lambda = \Delta_m / \Delta_{cr},\ \mu = \Delta_d / \Delta_{cr} \tag{2}$$

表5 墙体的延性系数

Tab. 5 The ductility coefficient of wall

试件编号	竖向压应力/MPa	极限延性系数 λ	破坏延性系数 μ
WZ-1	0.1	5.47	8.45
WZ-2	0.3	5.43	8.42
WZ-3	0.5	5.41	7.21
WZ-4	0.3	4.67	5.26

根据表5中数据可知：构造柱墙体的延性系数随着竖向压应力的增大而降低，表明竖向压应力越高，墙体延性越低。

在竖向压应力相同的情况下，WZ-2墙体的破坏延性系数延性约为WZ-4墙体的1.6倍，原因是由于构造柱能有效地抑制墙体的裂缝发展。因此增设构造柱对墙体的延性有一定的提升。

3 抗震承载力计算

根据沙漠砂蒸压加气混凝土砌块墙体在不同竖向压应力下的受力特点，结合《建筑抗震设计规范》[14]以及《砌体结构设计规范》[12]中的相关公式，建立沙漠砂蒸压加气混凝土砌块墙体抗震承载力计算公式。结合试验的结果，验证公式的可靠性。

沙漠砂蒸压加气混凝土砌块墙体在不同荷载下

的抗震承载力 V_u 可用式(3)表达。

$$V_u = \zeta_N f_v A / \gamma_{RE} \quad (3)$$

其中：A 是墙体的横截面面积；γ_{RE} 是承载力抗震调整系数，两端带有构造柱的墙体取 0.9。砌体抗震抗剪强度的正应力影响系数 ζ_N 是影响抗震承载力的重要因素。根据主拉应力理论以及库仑破坏理论[15]，可以分别得到砌体抗剪强度的两种一般表达式，即

$$f_v = f_{v0}\sqrt{1 + \frac{\sigma_y}{f_{v0}}} \quad (4a)$$

$$f_v = f_{v0} + \mu\sigma_y \quad (4b)$$

本研究所用沙漠砂蒸压加气混凝土砌块的砌体通缝抗剪强度设计值 f_v 为 0.103 MPa。通过试验数据，拟合了重力荷载代表值对应砌体截面平均压应力和砌体的抗剪强度设计值 σ_0/f_v 比值的计算式为

$$\zeta_N = 1.6 \times \sqrt{1 + 0.74\frac{\sigma_0}{f_v}} \quad (5a)$$

$$\zeta_N = 2.2 + 0.28\frac{\sigma_0}{f_v} \quad (5b)$$

将拟合得到的沙漠砂蒸压加气混凝土砌块墙体的正应力影响系数计算式代入式(3)，即可得到沙漠砂蒸压加气混凝土砌块墙体的抗震承载力计算公式。

通过计算求得在两种理论下沙漠砂蒸压加气混凝土砌块墙体抗震承载力的计算值见表 6。由表中数据可得，无论是用主拉应力理论还是用库仑破坏理论来计算沙漠砂蒸压加气混凝土砌块墙体的抗震承载力都是可以的。试验值与计算值的比值前者为 1.46，后者为 1.34，两者都有一定的安全储备。并且对比发现，用库仑破坏理论计算出的沙漠砂蒸压加气混凝土砌块墙体的抗震承载力的计算值更接近试验值。因此，考虑经济因素，实际设计中建议采用库仑破坏理论建立的公式确定沙漠砂蒸压加气混凝土砌块墙体的抗震承载能力。

表 6　计算值与试验值

Tab. 6　Calculation and test values

墙体编号	试验值 V_u/kN	主拉应力理论			库仑破坏理论		
		计算值 V_u'/kN	V_u/V_u'	V_u/V_u' 平均值	计算值 V_u''/kN	V_u/V_u''	V_u/V_u'' 平均值
WZ-1	137.9	87.37	1.58	1.46	102.87	1.34	1.34
WZ-2	180.5	118.28	1.53		125.49	1.44	
WZ-3	182.3	142.69	1.28		148.12	1.23	

4　恢复力模型骨架曲线的研究

本研究基于低周反复荷载试验，得出沙漠砂蒸压加气混凝土砌块墙体的恢复力模型的骨架曲线。

将墙体的极限承载力点(Δ_m, P_m)作为恢复力模型骨架曲线无量纲化的基准点，对 4 片沙漠砂蒸压加气混凝土砌块墙体的骨架曲线进行无量纲化，得到墙体的无量纲化的骨架曲线如图 13 所示。

沙漠砂蒸压加气混凝土砌块墙体的骨架曲线模型采用三折线模型，将试验结果分析与骨架曲线拟合得到简化的骨架曲线见图 14。3 个特征点分别为假定屈服点、极限承载力点和墙体破坏点。由于没有明显的屈服平台，本研究近似将假定屈服点取为开裂荷载点，墙体破坏点取为荷载下降到极限荷载 85% 的点。通过拟合计算求得 3 个特征点坐标依次为：屈服点 $A(0.2, 0.5)$，极限承载力点 $B(1.0, 1.0)$ 和破坏点 $C(\Delta_d/\Delta_m, 0.85)$。

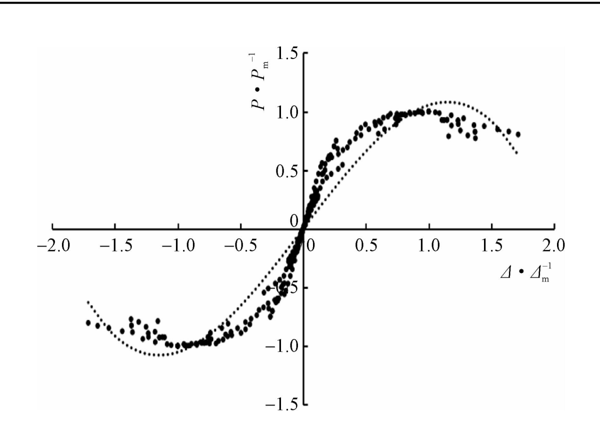


图 13　拟合的无量纲化骨架曲线

Fig. 13　Dimensionless skeleton curves fitted

1）弹性段刚度：根据试验结果可知沙漠砂蒸压加气混凝土砌块墙体没有明显的屈服平台，因此可以把墙体屈服前的骨架曲线简化成一条直线，即为图 14 中的 OA 段。OA 段的弹性刚度为

$$k_1 = \frac{P_{cr}/P_m}{\Delta_{cr}/\Delta_m} = \frac{0.5}{0.2} = 2.5 \quad (6)$$

OA 段可用下式表示为

$$\frac{P}{P_{\mathrm{m}}}=k_1\frac{\Delta}{\Delta_{\mathrm{m}}}=2.5\frac{\Delta}{\Delta_{\mathrm{m}}} \tag{7}$$

图14　简化的无量纲化骨架曲线

Fig. 14　Simplified dimensionless skeleton curves

2）弹塑性段刚度：墙体屈服后骨架曲线继续上升，在到达极限承载力前可以近似看成一条直线，即为图14中的 AB 段。AB 段的刚度为

$$k_2=\frac{1-P_{\mathrm{cr}}/P_{\mathrm{m}}}{1-\Delta_{\mathrm{cr}}/\Delta_{\mathrm{m}}}=\frac{1-0.5}{1-0.2}=0.625 \tag{8}$$

AB 段可用下式表示为

$$\frac{P}{P_{\mathrm{m}}}=0.5+k_2\left(\frac{\Delta}{\Delta_{\mathrm{m}}}-0.2\right)=0.625\frac{\Delta}{\Delta_{\mathrm{m}}}+0.3696 \tag{9}$$

3）破坏段刚度：墙体达到极限承载力后，其水平位移继续增加而荷载开始下降，将骨架曲线简化成一条直线，即为图14中的 BC 段。取破坏点的荷载为极限荷载的85%。BC 段的刚度为

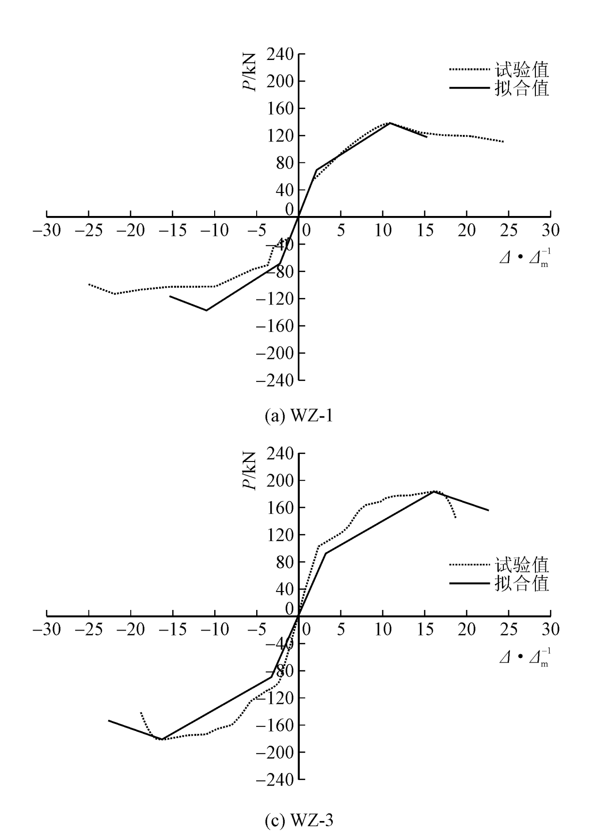
$$k_3=\frac{P_{\mathrm{d}}/P_{\mathrm{m}}-1}{\Delta_{\mathrm{d}}/\Delta_{\mathrm{m}}-1}=\frac{0.15\Delta_{\mathrm{m}}}{\Delta_{\mathrm{m}}-\Delta_{\mathrm{d}}} \tag{10}$$

BC 段可用下式表示为

$$\frac{P}{P_{\mathrm{m}}}=1+k_3\left(\frac{\Delta}{\Delta_{\mathrm{m}}}-1\right)=1+0.15\frac{\Delta-\Delta_{\mathrm{m}}}{\Delta_{\mathrm{m}}-\Delta_{\mathrm{u}}} \tag{11}$$

弹性阶段刚度 k_1 与通过弹性理论推导出的抗震墙在单位力作用下的初始理论刚度对比误差在10%以内。因此，以 k_1 用来表示墙体的初始刚度是适宜的。

将本研究拟定的恢复力模型骨架曲线与试验的骨架曲线进行对比，结果见图15。通过对比恢复力模型骨架曲线与4片沙漠砂蒸压加气混凝土砌块墙体的骨架曲线试验结果较为吻合，因此，本研究建立的恢复力模型骨架曲线能够反映沙漠砂蒸压加气混凝土砌块墙体的试验特点。



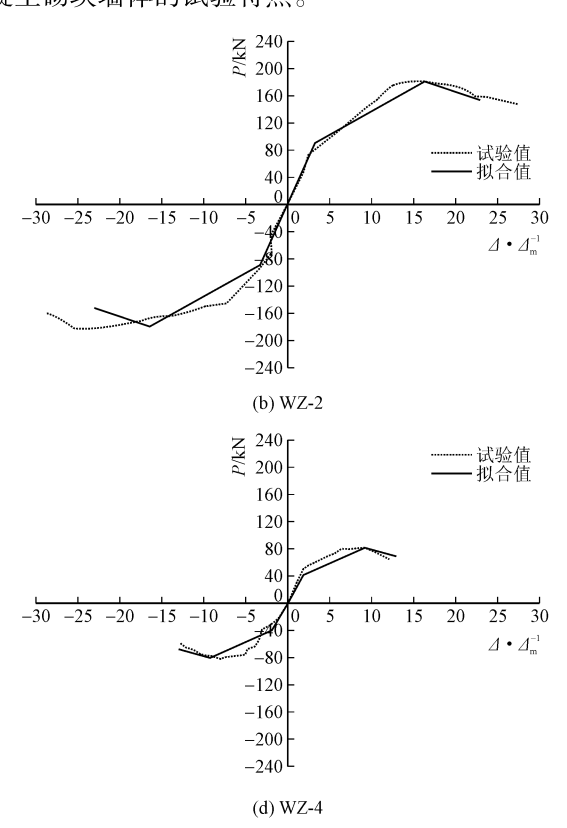


图15　沙漠砂蒸压加气混凝土砌块墙体恢复力模型骨架曲线与试验结果对比

Fig. 15　Comparison of skeleton curve and test results of the recovery force model of the sand steamed aerated concrete block

5 结 论

本研究运用了低周反复荷载试验,对 4 片沙漠砂蒸压加气混凝土砌块墙体的抗震性能进行了研究。得到如下的结论。

1)墙体的破坏主要是剪切破坏。素墙体主裂缝呈一条贯彻整个墙体的斜线,构造柱墙体的主裂缝呈"倒八"字型,由两根构造柱上部分别向砌体中下部延伸开展。

2)当竖向压应力增大时,墙体破坏时的裂缝增加,墙体的抗震承载力和抗侧刚度提高,而墙体的延性随竖向压应力的增大而减小。

3)竖向压应力一定时,构造柱墙体的极限承载力约是素墙体的 2.22 倍,延性比素墙体增加约 60%。刚度也均大于素墙体。

4)按照规范以及主拉应力理论和库仑破坏理论建立出适用于沙漠砂蒸压加气混凝土砌块墙体的抗震承载力计算公式,并且对比可知采用库仑破坏理论建立的计算公式更加适宜。

5)建立了恢复力模型骨架曲线,能够较好地反映沙漠砂蒸压加气混凝土砌块墙体的试验特点。

参考文献:

[1] 周强,赵文洋,杨凌宇,等. 打包带加固村镇砌体墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2020,41(增刊1):307-314.
ZHOU Qiang, ZHAO Wenyang, YANG Lingyu, et al. Study on seismic performance of masonry wall with polypropylene packing band reinforcement[J]. Journal of building structures, 2020, 41(S1):307-314(in Chinese).

[2] 牛爱宏,王玉山,王锐,等. 沙漠砂蒸压加气混凝土砌块墙体的抗震性能试验研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37(4):1629-1634.
NIU Aihong, WANG Yushan, WANG Rui, et al. Experimental study on seismic behavior of autoclaved aerated concrete block wall in desert sand[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2020, 37(4):1629-1634(in Chinese).

[3] 池斌,杨旭,王凤来,等. 严寒地区村镇配筋砌块砌体结构应用适宜度初探[J]. 建筑结构,2018,48(12):29-33.
CHI Bin, YANG Xu, WANG Fenglai, et al. Study on application suitability of reinforced concrete block masonry in villages in cold region[J]. Building structure,2018,48(12):29-33(in Chinese).

[4] 王地春. 废旧粘土砖治理生命周期环境影响评价[D]. 北京:清华大学,2013.

[5] 于元峰,张喜发,矫清先,等. 塔克拉玛干沙漠砂工程性质试验研究[J]. 中国沙漠,2007,27(3):362-366.
YU Yuanfeng, ZHANG Xifa, JIAO Qingxian, et al. Research on engineering properties of desert sands in Taklimakan desert[J]. Journal of desert research,2007,27(3):362-366(in Chinese).

[6] 杨小荟,王玉宝,崔东,等. 古尔班通古特沙漠砂的物理力学性质[J]. 中国沙漠,2005,25(4):563-569.
YANG Xiaohui, WANG Yubao, CUI Dong, et al. Physical and mechanical characters of sands in Gurbantonggut desert[J]. Journal of desert research,2005,25(4):563-569(in Chinese).

[7] ZHANG G X, SONG J X, YANG J S, et al. Performance of mortar and concrete made with a fine aggregate of desert sand[J]. Building and environment,2006,41(11):1478-1481.

[8] 李志强,王国庆,杨森,等. 沙漠砂混凝土力学性能及应力-应变本构关系试验研究[J]. 应用力学学报, 2019, 36(5):1131-1137.
LI Zhiqiang, WANG Guoqing, YANG Sen, et al. Experimental study on mechanical properties and stress-strain constitutive relations of desert sand concrete[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2019,36(5):1131-1137(in Chinese).

[9] JIN B H, SONG J X, LIU H F. Engineering characteristics of concrete made of desert sand from Maowusu sandy land[J]. Applied mechanics and materials,2012,174-177:604-607.

[10] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 蒸压加气混凝土性能试验方法:GB/T 11969—2020[S]. 北京:中国标准出版社,2020.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 砌体基本力学性能试验方法标准:GB/T 50129—2011[S]. 北京:中国计划出版社,2012.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 砌体结构设计规范:GB 50003—2011[S]. 北京:中国计划出版社,2012.

[13] CHOPRA A K. 结构动力学:理论及其在地震工程中的应用[M]. 3 版. 北京:清华大学出版社,2009.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

[15] 施楚贤. 砌体结构理论与设计[M]. 2 版. 北京:中国建筑工业出版社,2003.

(编辑 吕茵)